

УДК: 621.756

DOI: 10.17073/0021-3438-2015-1-57-62

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРИСТЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ИХ ЗАКРЫТОЙ И ОТКРЫТОЙ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКЕ

© 2015 г. Г.А. Баглюк, А.И. Хоменко

Институт проблем материаловедения (ИПМ) НАН Украины, г. Киев

Статья поступила в редакцию 13.06.13 г., подписана в печать 17.07.13 г.

Приведены результаты исследования с использованием метода координатных сеток особенностей деформированного состояния пористых заготовок на разных стадиях деформирования в закрытом и открытом штампах. Показано, что применение схемы открытой штамповки (ОШ) способствует повышению уровня интенсивности сдвиговых деформаций для всех слоев поковки по сравнению с закрытой штамповкой (ЗШ). В то же время при реализации схемы ОШ не удастся обеспечить получение беспористого состояния во всем объеме поковки при одинаковых массе навески и степени осевой деформации по сравнению с ЗШ вследствие выдавливания части материала поковки в облой на конечной стадии деформации. Это предопределяет необходимость корректировки в сторону увеличения массы материала заготовки под открытую штамповку.

Ключевые слова: открытая, закрытая штамповка, деформация, пористость, порошковая металлургия.

The results of studying the features of the strained state of porous billets at various deformation stages in the closed and open dies are presented. It is shown that the application of the open die forging (ODF) promotes an increase in the intensity level of shear deformations for all forging piece layers as compared with closed die forging (CDF). However, when implementing ODF, it is impossible to form the poreless state overall the forging piece volume with identical charge weight and degree of axial deformation as compared with CDF due to the partial extrusion of the forging piece material into the flash at the final deformation stage. This fact predetermines the necessity of correction towards increasing the billet weight for ODF.

Keywords: open and closed die forging, deformation, porosity, powder metallurgy.

Введение

Одним из наиболее эффективных процессов порошковой металлургии, обеспечивающих получение плотных (практически беспористых) изделий, в том числе и сложной формы, является горячая штамповка пористых заготовок. Этот процесс имеет много общего с классическими методами объемной штамповки компактных металлов, однако наличие пористости обуславливает известные особенности пластического течения пористых материалов, так как кроме формоизменения, присущего и беспористым материалам, сопровождается также необратимыми объемными изменениями. В связи с этим наряду с обычными для компактных материалов условиями течения металла, характеризующимися наличием свободной поверхности в деформируемой заготовке, пористые материалы могут деформироваться и в замкнутых объемах, когда нормальные

нагрузки на всей поверхности тела являются сжимающими [1, 2].

Именно такая технологическая схема, включающая изготовление заготовки, близкой по форме и размерам к поковке, и ее последующую горячую допрессовку в закрытом штампе (ЗШ) до конечных размеров и плотности простой осадкой без реализации сколь-либо заметных сдвиговых деформаций, нашла значительно более широкое применение в практике порошковой металлургии [1–4]. В значительной степени это обусловлено тем, что при использовании методов штамповки, которые обеспечивают быстрый переход от схемы одноосного сжатия к схеме неравномерного всестороннего сжатия, уменьшается вероятность появления трещин на боковой поверхности заготовок, что особенно важно для пористых материалов, имеющих, как правило, существенно более

Баглюк Г.А. — докт. техн. наук, ст. науч. сотр., зам. директора ИПМ НАН Украины (03680, Украина, г. Киев, ул. Кржижановского, 3). Тел.: (+38044) 424-12-01, 424-15-34. E-mail: gbag@rambler.ru.

Хоменко А.И. — канд. техн. наук, ст. науч. сотр. этого института. E-mail: dep36@ipms.kiev.ua; home-n-cow@yandex.ru.

Экспериментальные данные получены А.М. Буровым.

низкую пластичность по сравнению с компактными сплавами аналогичного состава.

В то же время известно, что как структура, так и основные механические свойства горячештампованных порошковых материалов существенно зависят от схемы деформации в процессе штамповки и применение схем деформации с развитым очагом поперечной деформации, в отличие от обычной допрессовки в закрытом штампе, позволяет получать материалы с более дисперсной структурой, повышенными прочностными и пластическими свойствами [5–8]. Вышеупомянутое способствовало более широкому использованию схем открытой или полузакрытой штамповки пористых заготовок [8–10], широко применяемых в обработке давлением компактных сталей и сплавов [11, 12].

Одной из наиболее распространенных схем штамповки компактных материалов является штамповка заготовок в открытых штампах (ОШ), характеризующаяся переменным зазором между верхней и нижней полуматрицами, в который вытесняется избыток материала заготовки (облой) [10–12]. Однако такая схема, несмотря на относительную простоту реализации, не нашла широкого использования в порошковой металлургии вследствие того, что в случае неоптимального выбора конструктивных размеров полости штампа (в частности, толщины облойного мостика) не удавалось получить поковки с высокой плотностью, что резко снижало прочностные и эксплуатационные характеристики материала штампованной детали [10]. Однако более поздние теоретические [13, 14] и экспериментальные [1, 4] работы подтвердили возможность успешного применения такой схемы для получения поковок из пористых порошковых заготовок.

В то же время в известных публикациях отсутствуют сравнительные данные относительно особенностей течения пористого материала в полости штампа при горячей штамповке с использованием различных схем деформации, что предопределило основную цель данной работы, посвященной исследованию с помощью метода координатных сеток особенностей деформированного состояния пористых заготовок на разных стадиях деформирования в закрытом и открытом штампах.

Методика экспериментов

Для экспериментального моделирования процесса горячей штамповки пористых заготовок при

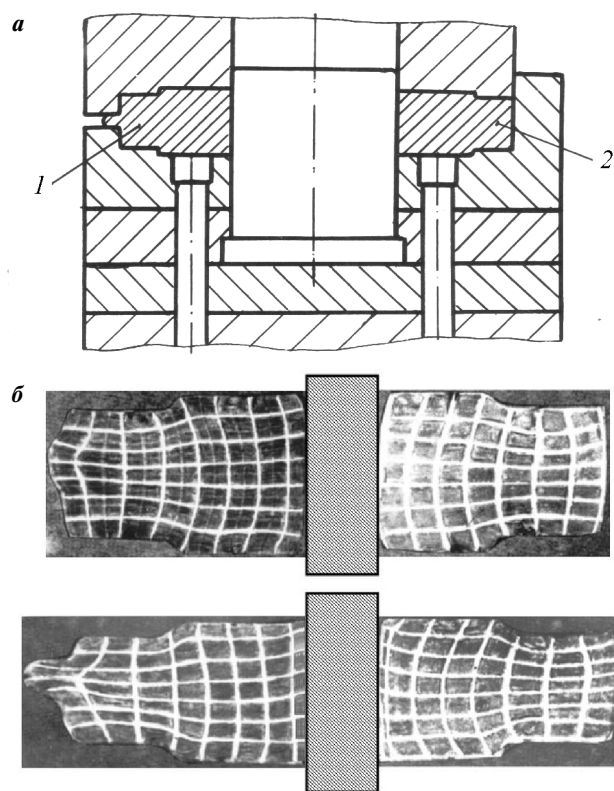


Рис. 1. Схема штампа для горячей штамповки пористых заготовок (а) и внешний вид продольных сечений поковок с нанесенной координатной сеткой после осадки с разными степенями деформации (б)

реализации различных схем деформации был изготовлен штамп (его схема представлена на рис. 1, а), в котором один из участков пористой заготовки деформировался по схеме открытой штамповки (ОШ) (поз. 1), а противоположный участок — закрытой штамповки (ЗШ) (поз. 2).

Исходные заготовки прямоугольной в плане формы с центральным отверстием прессовали из порошка железа под давлением 600 МПа и спекали в среде проточного водорода при температуре 1150 °С. Начальная пористость спеченных заготовок составляла 30–32 %.

Спеченные заготовки разрезали в продольном направлении вдоль оси прессования и на поверхность разреза наносили координатную сетку с размером ячейки 2×2 мм. Затем половинки образцов соединяли точечной сваркой, нагревали в среде проточного аргона до $t = 1150\text{ °С}$ и штамповали на дугогостаторном прессе усилием 1600 кН с разными степенями деформации. После каждого этапа деформации половинки образцов разъединяли и копировали изображения координатной сетки деформирован-

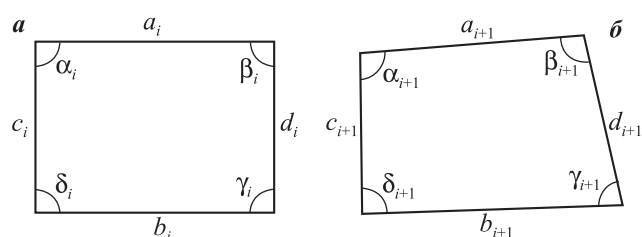


Рис. 2. Расчетная схема ячейки до (а) и после (б) деформации

ных образцов (см. рис. 1, б) с помощью сканера для ее дальнейшей цифровой компьютерной обработки.

Методика расчета

В процессе обработки экспериментальных данных с использованием программного комплекса «Тензор» [15] определяли координаты узлов сетки каждого из образцов, на их основе строили расчетные сетки и рассчитывали для каждой ячейки сетки (рис. 2) компоненты тензора деформаций, считая схему деформации плоской.

Расчет производился по следующей схеме. Считали, что на начальном шаге деформации прямоугольная ячейка сетки имела прямоугольную форму со сторонами a_i , b_i , c_i и d_i (см. рис. 2, а), а на $(i + 1)$ -м шаге деформации (см. рис. 2, б) длина сторон ячейки была a_{i+1} , b_{i+1} , c_{i+1} и d_{i+1} соответственно. Тогда величины компонентов тензора деформации для каждой ячейки можно записать в виде

$$\varepsilon_x = \ln \left(\frac{a_{i+1} + b_{i+1}}{a_i + b_i} \right), \quad (1)$$

$$\varepsilon_y = \ln \left(\frac{c_{i+1} + d_{i+1}}{c_i + d_i} \right), \quad (2)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{4} [(\alpha_{i+1} - \alpha_i) + (\beta_{i+1} - \beta_i) + (\gamma_{i+1} - \gamma_i) + (\delta_{i+1} - \delta_i)]. \quad (3)$$

Используя значения компонентов тензора деформаций, для каждой ячейки сетки рассчитывали также значение объемной деформации (с учетом плоской схемы деформации):

$$\varepsilon = \varepsilon_x + \varepsilon_y \quad (4)$$

и интенсивность сдвиговых деформаций:

$$H_i = \sqrt{\frac{2}{3} (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + 6\gamma_{xy}^2}. \quad (5)$$

Принимая во внимание, что [6]

$$\varepsilon = \ln[(1 - \theta_i)/(1 - \theta_{i+1})], \quad (6)$$

из выражения (6) находили пористость θ_{i+1} каждой ячейки после $(i + 1)$ -го этапа деформации:

$$\theta_{i+1} = 1 - \frac{1 - \theta_i}{\exp(\varepsilon_x + \varepsilon_y)}. \quad (7)$$

Анализ полученных результатов

Результаты цифровой обработки полученных экспериментальных данных позволили оценить эволюцию изменения основных параметров деформированного состояния поковки в процессе штамповки.

На рис. 3—5 показаны графики распределения деформационных характеристик 1-го, 4-го и 7-го горизонтальных слоев поковки в направлении от центра к периферии (по оси абсцисс отложены номера ячеек в горизонтальном направлении).

Анализ кривых распределения радиальной деформации (рис. 3) показывает, что при сходности в целом вида кривых ε_r для верхнего и нижнего (кр. 1 и 7 соответственно) слоев поковки значения величин ε_r для схемы открытой штамповки несколько выше практически для всех ячеек этих слоев. В то же время характер формы кривой ε_r для среднего горизонтального слоя (кр. 4) существенно отличается.

В большей части объема поковки радиальная деформация среднего слоя существенно выше, чем для верхнего и нижнего слоев как для открытой, так и закрытой штамповки, что может быть объяснено как меньшим охлаждением внутренних слоев материала, так и влиянием контактного трения, которое обуславливает уменьшение радиальной деформации приконтактных слоев поковки. При этом характер тренда кривой ε_r для открытой и закрытой штамповок существенно различается. Если для ЗШ значения ε_r монотонно снижаются от центра к периферии и приобретают отрицательные значения в близких к периферии слоям поковки (кр. 4 на рис. 3, б, г), то при использовании схемы ОШ величина радиальной деформации увеличивается для всех ячеек слоя за исключением крайнего участка со свободной поверхностью (кр. 4 на рис. 3, а, в).

Подобное различие наблюдается и для характера распределения осевых деформаций (см. рис. 4): для схемы ЗШ величина отрицательного значения ε_z уменьшается от центра к периферии (кр. 4 на рис. 4, б, г), тогда как для ОШ — резко возрастает (кр. 4 на рис. 4, а, в). Следует отметить, что независи-

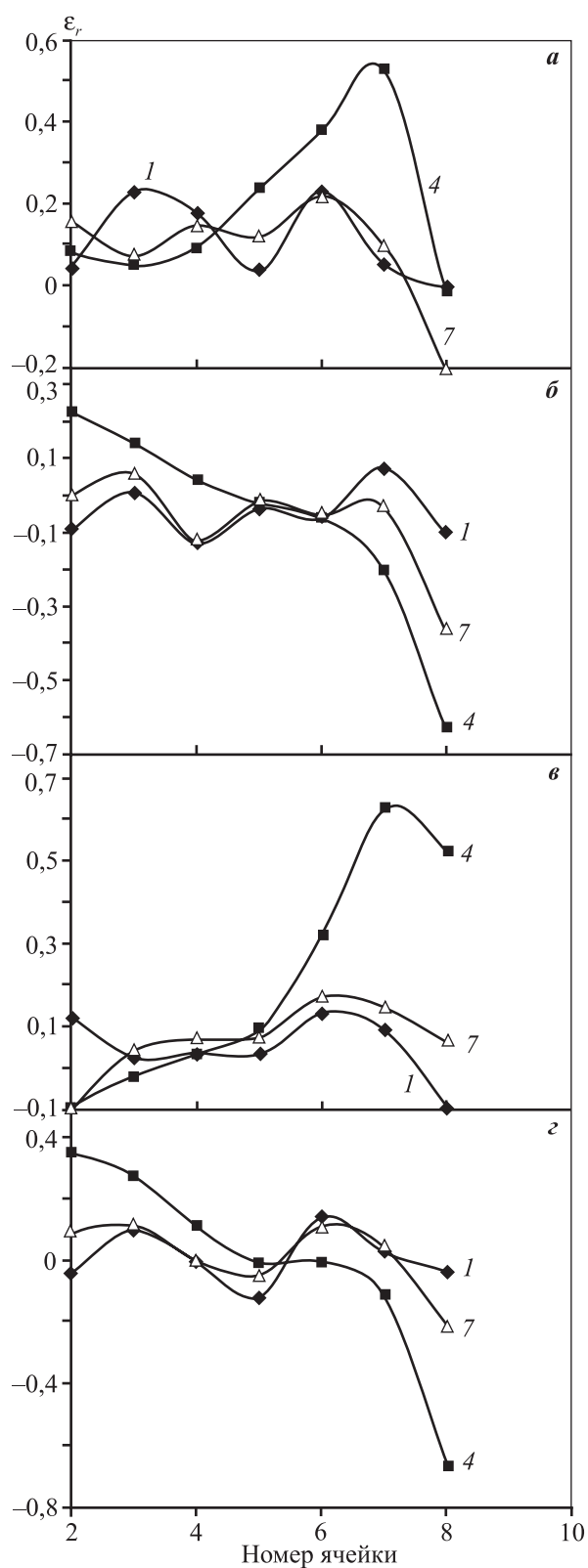


Рис. 3. Распределение радиальной деформации в горизонтальных слоях № 1 (верх), 4 (середина) и 7 (низ) для первого (а, б) и конечного (в, г) этапов деформации а, в – участок открытой штамповки; б, г – закрытой штамповки

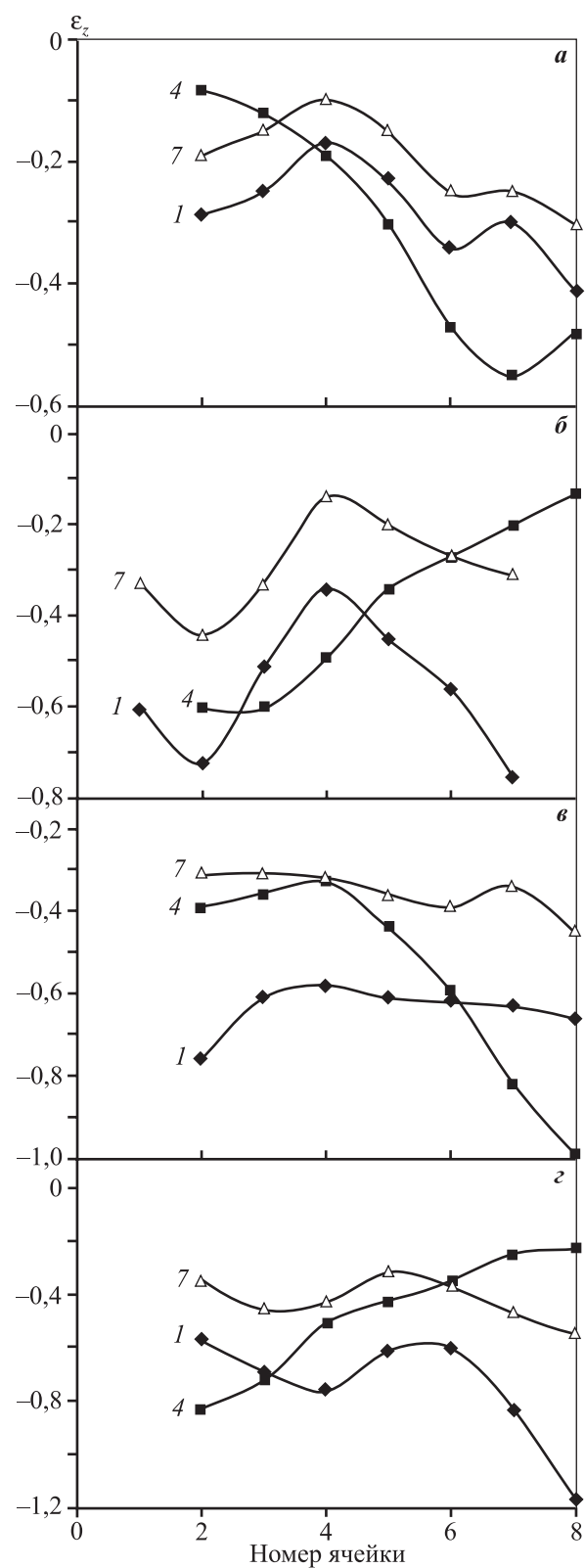


Рис. 4. Распределение осевой деформации в горизонтальных слоях поковки

Обозначение рисунков и кривых аналогично рис. 3

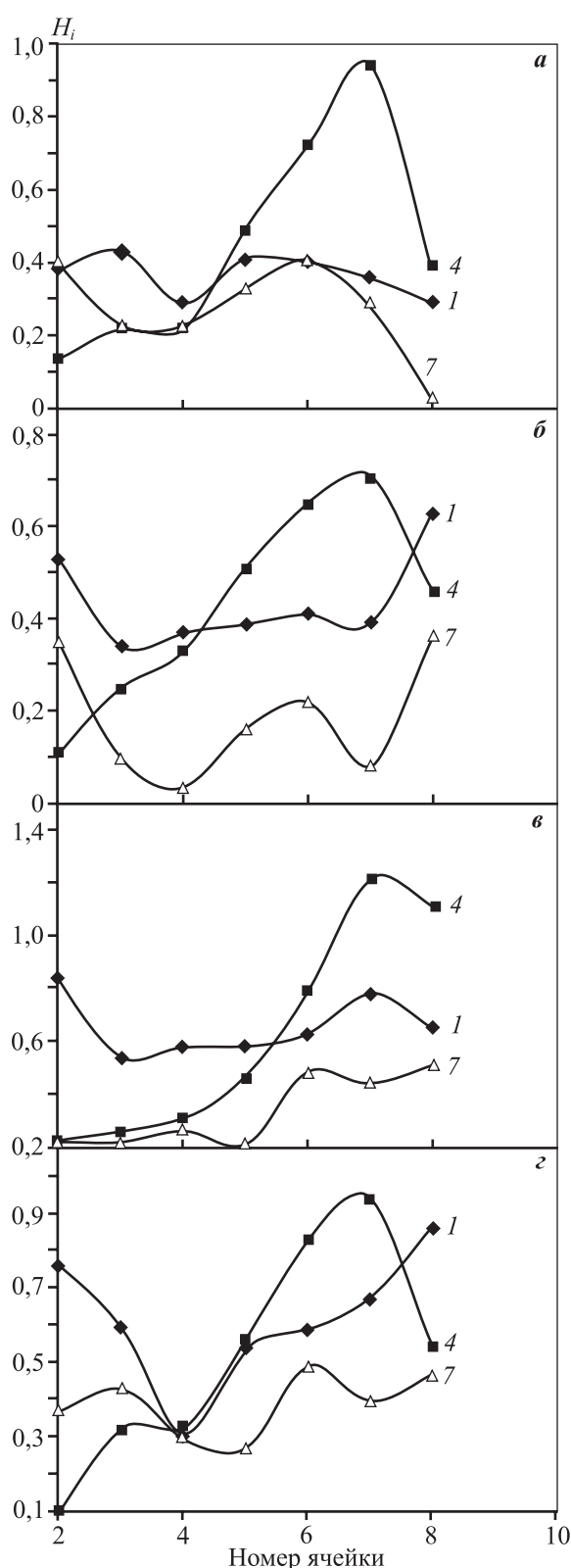


Рис. 5. Распределение интенсивности сдвиговых деформации в горизонтальных слоях поковки
Обозначение рисунков и кривых аналогично рис. 3

мо от применяемой схемы штамповки степень осевой деформации для верхнего слоя поковки (кр. 1) заметно выше по сравнению с нижним слоем (кр. 7), что обусловлено большим охлаждением слоев поковки, непосредственно контактирующих с относительно холодной поверхностью нижней полуматрицы.

Аналогичная закономерность относительно различия верхнего и нижнего слоев проявляется и для значений интенсивности сдвиговых деформаций, характеризующей интегральную величину накопленной деформации в разных зонах поковки (см. рис. 5). Обращает на себя внимание заметное снижение величины H_i в крайних ячейках сетки, ограниченных боковой поверхностью поковки, в среднем горизонтальном слое (кр. 4) независимо от схемы деформации. Это, по-видимому, может быть обусловлено наличием свободной боковой поверхности на протяжении значительной части цикла деформирования заготовок, имеющих начальный зазор по отношению к боковым стенкам матрицы.

Следует также отметить, что применение схемы открытой штамповки способствует увеличению уровня интенсивности сдвиговых деформаций для всех слоев поковки по сравнению с закрытой штамповкой (см. рис. 5, в, г), что свидетельствует о наличии более развитого очага деформации при использовании схемы ОШ. Такой характер деформации оказывает заметное влияние на структуру получаемого материала: как следует из работы [6], структура горячештампованной ОШ-поковки отличается существенно большей степенью дисперсности и наличием ярко выраженной текстуры по сравнению с отштампованной простой допрессовкой ЗШ-поковкой.

Анализ характера распределения пористости по объему поковки на разных стадиях деформирования показал (рис. 6, а, в), что после первого этапа деформации для схем как открытой, так и закрытой штамповки проявляется существенная неравноплотность по сечению заготовки — наряду с участками с высокой плотностью ($\theta = 1\div3\%$) в отдельных объемах отмечаются значения пористости около 15 %. После завершения второго этапа деформации заготовка, отштампованная в закрытом штампе (когда реализуется более жесткая схема деформации), имеет практически нулевую пористость по всему объему поковки (в связи с этим рисунок не приведен). В то же время при реализации схемы ОШ некоторые локальные объемы поковки после второй стадии деформации имеют пористость, достигающую 7 %, что обусловлено наличием свободной боковой

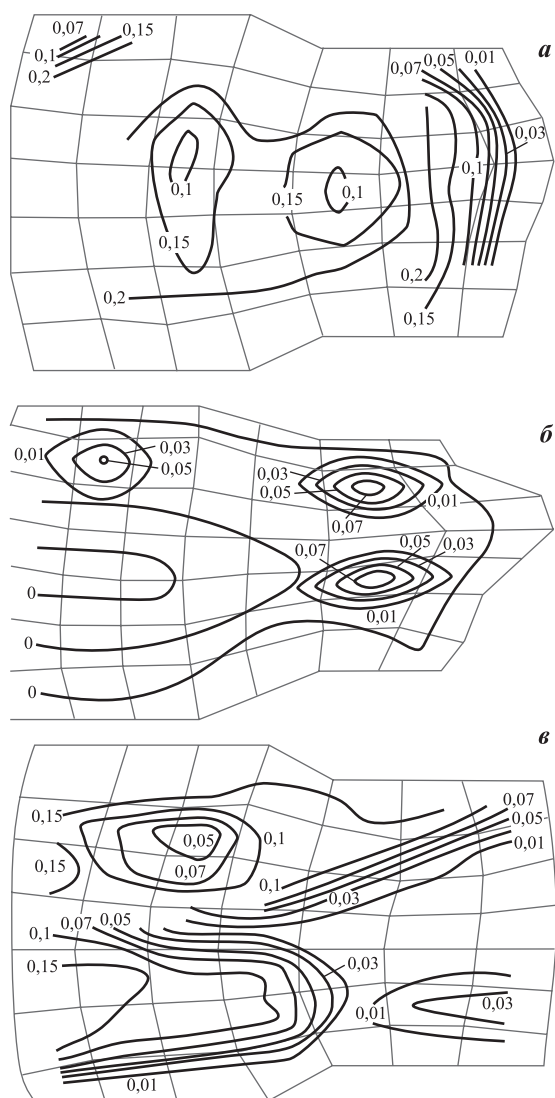


Рис. 6. Распределение пористости по сечению поковки после первого (*а, в*) и второго (*б*) этапов деформирования для схем открытой (*а, б*) и закрытой (*в*) штамповки

поверхности на значительном промежутке цикла штамповки, способствующим выдавливанию части материала поковки в облой на конечной стадии допрессовки. Эти результаты достаточно хорошо коррелируют с выводами, полученными в работах [13, 14] по результатам численного моделирования процесса открытой штамповки пористых заготовок.

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что применение схемы открытой штамповки с более развитым очагом деформации способствует повышению уровня интенсивности сдви-

говых деформаций для всех слоев поковки по сравнению с закрытой штамповкой. В то же время при реализации схемы ОШ не удастся обеспечить получение беспористого состояния во всем объеме поковки при одинаковых массе навески и степени осевой деформации по сравнению с ЗШ вследствие выдавливания части материала поковки в облой на конечной стадии допрессовки. Это предопределяет необходимость корректировки в сторону некоторого увеличения массы материала заготовки под открытую штамповку.

Литература

1. Дорофеев Ю.Г., Гасанов Б.Г., Дорофеев В.Ю. и др. Промышленная технология горячего прессования порошковых изделий. М.: Металлургия, 1990.
2. Кун Х.А. // Порошковая металлургия материалов специального назначения. М.: Металлургия, 1977. С. 143–158.
3. Баглюк Г.А. // Вісн. нац. техн. унів. Укр. «Київський політехнічний інститут». Машинобудування. 2009. Вип. 56. С. 93.
4. Дорофеев Ю.Г. Динамическое горячее прессование пористых порошковых заготовок. М.: Металлургия, 1977.
5. Баглюк Г.А. // Реологія, структура, властивості порошкових та композиційних матеріалів: Збірник наук. праць. Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2004. С. 35.
6. Баглюк Г.А. // Обработка материалов давлением: Сб. науч. тр. Краматорск: ДГМА, 2011. № 1 (26). С. 139.
7. Дорофеев В.Ю. // Порошк. металлургия. 1985. № 7. С. 23.
8. Павлов В.А., Носенко М.И. // Там же. 1988. № 2. С. 16.
9. Павлов В.А., Носенко М.И. // Там же. № 1. С. 1.
10. Живов Л.И., Сыпко А.В., Долгий Н.И. // Кузн.-штамп. пр-во. 1975. № 3. С. 47.
11. Брюханов А.Н. Ковка и объемная штамповка. М.: Машиностроение, 1975.
12. Ковка и штамповка: Справочник. В 4 т. Т. 2. Горячая штамповка / Под ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 1986.
13. Баглюк Г.А., Юрчук В.Л. Расчет пластического течения пористого материала при штамповке в открытом штампе // Порошк. металлургия. 1997. № 7/8. С. 1.
14. Баглюк Г.А. Моделирование процесса деформации пористой заготовки в открытом штампе // Там же. № 9/10. С. 5.
15. Баглюк Г.А., Хоменко А.И. // Вестн. нац. техн. ун-та ХПИ. 2010. Вып. 34. С. 47.